

DEFECTS OF STEEL CASTINGS CAUSED BY REOXIDATION

VADY OCELOVÝCH ODLITKŮ ZPŮSOBENÝCH REOXIDACÍ

P. VESELÝ¹, P. VAVRINEC², L. HŘEBÍČEK³, J. ŠENBERGER⁴, A. ZÁDĚRA⁵, V. PERNICA⁶

ABSTRACT: Reoxidation of steel is a term for summary designation of secondary and tertiary oxidation of steel occurring during keeping the metal in a ladle after tapping it from a furnace and during casting in a mould cavity. During reoxidation the oxygen concentration and its activity in a casting are growing. In case that oxygen activity exceeds the equilibrium activity of oxygen with carbon the casting part or the whole casting can be afflicted with gas cavities of carbon monoxide. With higher oxygen activity the formations of oxides of elements with lower deoxidation ability (Mn, Si) continues. Those oxides can form in castings the extensive slaggy formations in their volume or on the casting surface designated as secondary slag inclusions. Thus the steel reoxidation directly influences surface and internal quality of steel castings and consequently the manufacturing costs too.

KEY WORDS: steel casting, secondary oxidation, oxygen activity

1 ÚVOD

Vady ocelových odlitků a s nimi často související neshodná výroba (*zmetkovitost*) jsou jevy neodlučitelně spjaté s výrobou oceli již proto, že jejich podstata spočívá v samotné neurčitosti lidského poznání, technických znalostí a jednání. Vady jsou také velmi často důsledkem nedokonalých a špatně řízených technologií i prosté lidské nekázně. Kontrola během některých výrobních fází je obtížná často i tím, že nejsou k dispozici finančně dostupné a dostatečně přesné metody sledování všech parametrů používané technologie [1].

Při výrobě ocelových odlitků dochází v praxi ke vzniku celé řady vad. Jejich klasifikace a členění je prováděno nejčastěji podle charakteristických rysů vady nebo společného mechanismu jejich vzniku. Vady odlitků ze slitin železa byly tímto způsobem popsány a rozčleněny v knize [2] a to do sedmi tříd vad dále rozdělených do skupin vad.

Ve slévárně DSB EURO se u ocelových odlitků vyskytují v největší míře dva typy vad. Podle výše uvedené klasifikace [2] lze tyto vady rozčlenit do dvou tříd a to na vady porušení souvislosti (300) a vady typu makroskopické vměstky a vady makrostruktury (500). V rámci výzkumu byly řešeny povrchové vady, které způsobují ve slévárně DSB největší finančních ztráty. Celý výzkum byl rozdělen do několika po sobě následujících kroků:

1. identifikace vady;
2. určení mechanismu jejího vzniku;
3. definování hlavních faktorů majících vliv na vznikající vady;
4. kvantifikace a sledování jednotlivých technologických a metalurgických parametrů;
5. navržení nápravných opatření.

¹ Ing. Pavel Veselý – DSB EURO, Gellhornova 18, Blansko

² Ing. Pavel Vavrinec – DSB EURO, Gellhornova 18, Blansko

³ Ing. Lukáš Hřebíček – DSB EURO, Gellhornova 18, Blansko

⁴ doc. Ing. Jaroslav Šenberger, CSc. – FSI, VUT v Brně, ÚST, odbor slévárenství

⁵ Ing. Antonín Záděra, Ph.D. – FSI, VUT v Brně, ÚST, odbor slévárenství

⁶ Vítězslav Pernica – FSI, VUT v Brně, ÚST, odbor slévárenství

První dva kroky, tj. identifikace vady a stanovení mechanismu jejího vzniku musí vždy jakýmkoliv nápravným opatřením předcházet. V opačném případě jsou tato opatření volena tzv. metodou „pokusu a omylu“ a odstranění vady je tak do značné míry pouze náhodné. V rámci předchozích prací, publikovaných již např. v [3,4] bylo zjištěno, že povrchové vady mají struskovitý charakter, kdy složení těchto strusek a okolního kovu se vyznačuje:

- značná heterogenita a chemické složení analyzovaných vzorků strusek a zadrobenin ukazuje na původ zkoumaných vad v sekundární oxidaci oceli;
- při analýze oxidických vměstků v kovu v bezprostředním okolí zkoumaných vad byl potvrzen průběh reoxidačních pochodů. Na vměstcích v okolí těchto vad se podílely prvky s nižší dezoxidační schopností, jako Si, Mn a také Fe;
- u většiny vzorků bylo při analýze ve vzorcích strusek a zadrobenin nalezeno zirkonium. Vzhledem k tomu, že se Zr v průběhu výroby do kovu nepřidávalo, lze hledat příčinu jeho výskytu v analyzovaných vzorcích v odlupování nátěru formy;
- u větších odlitků docházelo ke koagulaci produktů reoxidace a v odlitcích se vytvářely rozsáhlé zadrobeniny. Uvnitř zadrobenin se nacházely také oxidy železa.

Dalším typem vad nalezených na sledovaných odlitcích byly trhliny. Výzkum byl zaměřen na vady vzniklé v důsledku reoxidace.

2 METODIKA SLEDOVÁNÍ A MĚŘENÍ VAD, PROVOZNÍ ZKOUŠKY

V první etapě výzkumu tak bylo zjištěno, že povrchové vady nacházející se na ocelových odlitcích jsou vady typu sekundární struskovitost. Tyto vady vznikají jako důsledky reoxidačních pochodů, které probíhají při odlévání ve fázi plnění dutiny formy. Reoxidaci kovu můžeme zkoumat čtyřmi základními způsoby :

- Sledováním změn chemického složení kovu.
- Sledováním výskytu a složení vměstků v kovu.
- Analýzou vad odlitků.
- Sledováním změn aktivity kyslíku kovu.

První tři metody lze považovat za metody nepřímé, protože zkoumají důsledky reoxidace po ztuhnutí a vychladnutí odlitku. Čtvrtá metoda umožňuje přímé sledování změn kovu probíhajících zejména při jeho sekundární oxidaci prostřednictvím změny aktivity kyslíku. O metodě přímého měření aktivity kyslíku a nepřímé metodě sledování poklesu v roztoku rozpuštěného hliníku je možno mluvit jako o kvantitativních metodách, které přímo numericky popisují procesy sekundární oxidace oceli. Další výše zmíněné metody popisují sekundární oxidaci zprostředkovaně, až na základě analýzy produktů reoxidace a jedná se tak spíše o kvalitativní (semikvantitativní) metody.

Sekundární struskovitost se v DSB EURO vyskytuje u více typů odlitků. Největší finanční ztráty vznikají u odlitků ventilů, který tvoří v DSB největší podíl odlitků o větší hmotnosti (cca 1 – 12 t). Pro sledování výskytu vad a ověření opravných opatření byl zvolen typový odlitek ventilu z nelegované oceli o hrubé hmotnosti cca 4 t viz obr. 1.



Obr. 1 – Zkušební odlitek ventilu, hmotnost 4t

Pro kvantifikaci reoxidačních pochodů byly u zkušebního odlitku zvoleny všechny čtyři výše uvedené metody, tj. měření aktivity kyslíku během odlévání kovu do formy, sledování změn chemického složení kovu, analýza vad odlitků a složení vměstků v kovu bezprostředním okolí vady.

2 KVANTIFIKACE VAD

Pro zjištění příčin vad a návrh na jejich minimalizaci je důležité kvantifikovat vliv jednotlivých technologických faktorů na jejich rozsah. To umožňuje navrhnout vhodný způsob sledování příčin vad v technologickém procesu. Nejprve jsou určeny parametry, které popisují rozsah vad. V tomto sledování byly zvoleny jako závislé proměnné:

- Plocha vad zjištěná jako plocha uvnitř křivky vedené tak, aby zahrnovala všechny vady.
- Objem vad zjištěný pomocí plastického materiálu vtlačeného do vady po jejím odstranění (vydrážkováním, vybroušením) tak, aby zcela zaplnil prostor odstraněného materiálu. Následně po vyjmutí plastického materiálu se změří jeho objem.
- Spotřeba elektrod na zavaření dutiny po vadě.

Výše uvedené proměnné byly vztaženy na celkovou plochu a celkový objem odlitku. Byla tak získána bezrozměrná kritéria udávající „měrnou velikost“ vady:

- Poměr plochy vad k celkovému povrchu odlitku.
- Poměr objemu vad ku celkovému objemu odlitku.

Jako nezávisle proměnné byly sledovány technologické parametry související s výrobou odlitků. Jako příklad je uvedena volba proměnných pro oblast odlévání forem. Výsledky sledování jsou shrnuty v **tab.1**. Vybrané parametry popisující technologické vlivy během odlévání jsou:

- Doba sušení složené formy před odléváním v hodinách – řádek 2.
- Doba přehřevu pánve v hodinách – řádek 3.
- Teplota kovu na žlábků – řádek 4.
- Teplota licí. Po odpichu byla upravena teplota kovu argonováním kovu v pánvi. Teplota po argonování je uvedena jako teplota licí. Forma se odlévala ve stejné lodi a převoz kovu se uskutečnil do jedné minuty – řádek 5.
- Doba lití – řádek 6. (u tavby B4, B5, B6 nebyla doba lití změřena).
- Průměr výlevky – řádek 7.
- Hmotnost odlitého kovu – řádek 8
- Typ filtru – řádek 9. K odlévání byly použity dva typy filtrů. Kazetový filtr označený v tabulce jako „rošt“ a karuselový filtr označený v tabulce jako „kar“.

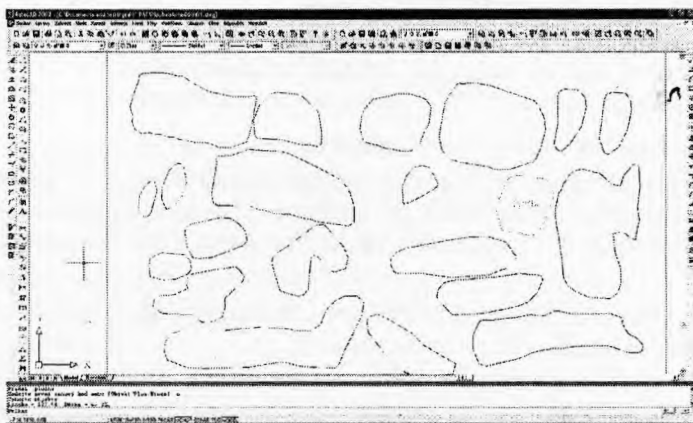
Tab. 1 Hlavní technologické parametry vztažené k fázi odlévání

1002-08754/	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
1. číslo tavby	1/ 7233	1/ 7234	2/ 6816	2/ 6817	2/ 6830	2/ 6831	1/ 7266	2/ 6848	2/ 6852	2/ 6864
2. sušení [hod.]	2,75	2	3	3,5	3	2	5	4,5	2,5	0
3. přehřev pánve [hod.]	2,75	2,25	2,75	2,5	2,25	2	2	2,75	3	3,5
4. teplota na žlábků [°C]	1590	1622	1590	1600	1615	1600	1605	1620	1645	1620
5. licí teplota [°C]	1560	1580	1560	1565	1585	1575	1575	1595	1605	1595
6. doba lití [s]	143	75	82	65	-	-	-	80	96	138
7. výlevka [mm]	80	80	70	70	70	70	80	70	80	80
8. odlitý kov [Kg]	5920	5340	5660	5140	5280	5200	5640	5600	5480	5440
9. typ filtru	kar	rošt	kar	žádný	žádný	žádný	kar	kar	rošt	rošt

Po první magnetické polévaci zkoušce byly zaměřeny povrchy vad. Po jejich vydrážkování byl měřen objem vad. První magnetická polévací zkouška je rozhodující pro indikaci naprosté většiny vad. Měření po druhé a třetí zkoušce nebylo prováděno, protože se při nich objevovalo jen minimum vad. Převážně se jedná o praskliny od svarů a některé opomenuté vady.

Povrch vad byl obkreslen na folie, z kterých byly pomocí skeneru plochy naskenovány do počítače. Výchozím se stal rastrový obrázek, který po vyretušování a úpravách byl zvektorizován v programu *Algolab Raster to Vector Conversion Toolkit*. Po vektorizaci již bylo možné s křivkami pracovat v programu AutoCAD 2002, ve kterém již byl vyčíslen obsah povrchu obkreslené křivky. Postup zakreslení povrchu vad u jednoho odlitku je uveden na obr.2. Tato metoda byla zvolena pro snadnou a současně vysokou přesnost stanovení povrchu vad. Digitalizace ploch umožňuje i jejich další snadné zpracování. Podle poměru nejširšího a nejúžšího místa vady lze také oddělit trhliny od ostatních typů vad.

Objem vydrážkovaných vad byl změřen pomocí plastické hmoty užívané ve slévárně ve formě válečků na zabezpečení těsnosti dělicí roviny. Hmota byla namačkána do každé vydrážkované vady. Po vyjmutí hmoty z vady byl v odměrném válci s vodou změřen její objem.



Obr. 2 Postup zakreslení ploch vad u jednoho odlitku

Výsledky měření povrchu a objemu vad jsou uvedeny v tab.2. Tavby označené B2, B6 a B7 nebyly čistírensky zpracovány v DSB s.r.o. Svarový kov byl zjištěn na základě spotřeby elektrod na jeden odlitek a hmotnosti jedné elektrody.

Tab. 2 Výsledky měření plochy a objemu vad a také hmotnosti svarového kovu

1002-08754/	obsah povrchu vad [dm ²]	% z celkového obsahu povrchu	vydrážkovaný objem vad [dm ³]	% z celkového objemu odlitku	svarový kov [Kg]
B1	44,65	4,32	3,32	0,97	43,44
B2	-	-	2,06	0,60	18
B3	16,53	1,60	1,53	0,45	20,02
B4	35,2	3,41	2,48	0,73	32,45
B5	52,79	5,11	2,77	0,81	36,24
B6	-	-	-	-	-
B7	-	-	4,13	1,21	36
B8	23,51	2,28	2,04	0,60	26,62
B9	24,28	2,35	1,9	0,55	24,79
B10	38,13	3,69	2,18	0,64	28,52

Během hodnocení vad bylo zjištěno, že mimo vad spojených s reoxidačními pochody se vyskytují ve značném objemu i vady typu trhlin. Pro hodnocení vlivu reoxidačních pochodů na

vznik vad a následující zvýšení nákladů na opravy byly plochy a objemy vad rozděleny na vady způsobené reoxidací a vady typu trhlin. Výsledky rozdělení vad na vady způsobené reoxidací a vady typu trhlin je uvedeno v **tab.3**. V tabulce jsou hodnoceny jen vady u odlitků, které byly čistírensky zpracovány v DSB s.r.o.

Tab. 3 Rozdělení vad na vady způsobené reoxidací a vady typu trhlin

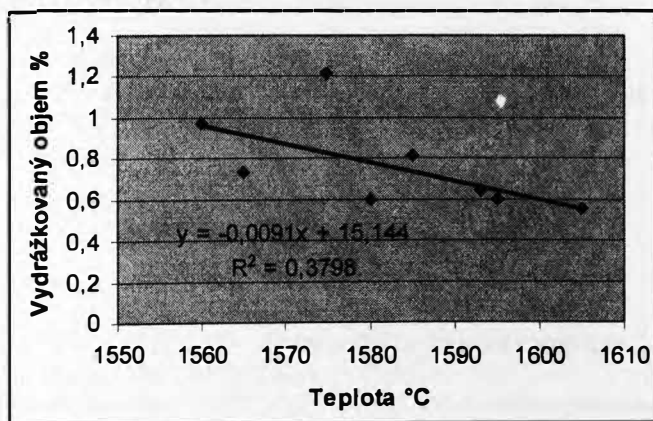
	Plocha vad bez trhlin [dm ²]	% z celk. obsahu vad	Objem vad bez trhlin [dm ³]	% z celk. objemu vad	Plocha trhlin [dm ²]	% z celk. obsahu vad	Objem trhlin [dm ³]	% z celk. objemu vad
B1	34,62	77,54	1,66	53,04	10,03	22,46	46,96	44,28
B3	5,02	30,37	0,10	6,99	11,51	69,63	93,01	86,93
B5	38,23	72,42	---		14,56	27,58		---
B9	16,47	67,83	0,70	41,67	7,81	32,17	58,33	48,04
B8	12,91	54,91	---		10,60	45,09		---
B10	25,60	67,14	1,20	60,00	12,53	32,86	40,00	36,70
Ø	132,85	61,78	0,92	44,44	67,04	38,24	55,56	53,99

3 INTERPRETACE VÝSLEDKŮ

Závisle proměnné popisující rozsah vad jsou číselně popsány v **tab. 2** a **tab. 3**. Nezávisle proměnné technologické parametry vztahující se k fázi odlévání jsou číselně vyjádřeny v **tab. 1**. Číselné vyjádření rozsahu vad i technologických parametrů umožňuje nyní matematické zpracování. V prvním kroku byl vyhodnocen vliv technologických parametrů na celkový vydrážkovaný objem vad. Celkový vydrážkovaný objem vad udává nejpřesněji zvýšení nákladů na opravy.

Vliv sušení forem a předehřevu pánve se na rozsah vydrážkovaného objemu vad statisticky významně neprojevil. Soubor dat u obou proměnných byl sledován jen v úzkém intervalu. Zejména v případě sušení forem nebyla získána vypovídající informace o vlivu delší doby sušení než 5 hodin na rozsah vad.

Mezi teplotou oceli na žlábků a lící teplotou existuje logická korelace. Tavby, u kterých se požadovala vyšší lící teplota byly ohřáté na vyšší odpichovou teplotu a tedy dosáhly i vyšší teploty oceli na žlábků. Závislost mezi teplotu na žlábků a výskytem vad ukazuje na tendenci snižování rozsahu vad se zvýšením lící teploty. Závislost není statisticky významná. Korelace mezi lící teplotu a rozsahem vad je statisticky významná ve zvolené hladině pravděpodobnosti $p=0,10$. Závislost je uveden na **obr.3**.



Obr.3 – Závislost mezi vydrážkovaným objemem a lící teplotou.

Doba lití byla závislá na použitých systémech filtrace a na teplotě. Mezi dobou lití a vydrážkovaným objemem se očekávala korelace. Vliv doby lití se nepodařilo zaznamenat u odlitků odlévaných bez filtrace. Lze však očekávat, že u těchto odlitků byla nejkratší doba lití. Závislost nebyla statisticky významná a mohla být překryta dalšími vlivy.

Mimo způsob filtrace mohl ovlivnit dobu lití i průměr výlevky. Vliv průměru výlevky a také hmotnosti odlitého kovu na vydrážkovaný objem nebyl pozorován.

Účinnost filtrace kovu byla sledována porovnáním souboru čtyř odlitků filtrovaných za použití karuselu, tří odlitků za použití kazetových filtrů a tří odlitků nefiltrovaných. Rozsahy souborů byly však malé a proto k jejich hodnocení nebylo dále přihlíženo.

4 SHRNU TÍ VÝSLEDKŮ A ZÁVĚR

1. Byla ověřena metodika analýzy vlivu technologický parametrů na výskyt vad způsobených reoxidací oceli.
2. Vedle vad způsobených reoxidací je nutné řešit při výrobě odlitků ventilů o hmotnosti 1 až 10 t i problematiku vzniku trhlin. Opravy vyvolané trhlínami z hlediska spotřeby svarového kovu jsou rozsáhlejší než ostatní povrchové vady.
3. U odlitků odlitých z teplejšího kovu se snížil celkový objem vydrážkovaných vad. U těles ventilů odlitých s teplotou kovu vyšší než 1590 °C klesl celkový objem vydrážkovaných vad o 33 %. Vedení výroby lze doporučit zvýšení lící teploty.
4. Použití filtrů nepřineslo čekávané zlepšení jakosti odlitků a je spojeno s významným zvýšením nákladů.

Příspěvek byl zpracován za podpory MPO v rámci projektu TANDEM, ev. č. FT—TA5/089 „Výzkum a vývoj nové technologie odlévání železa“.

5 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ŠENBERGER, J., STRÁNSKÝ, K., ZÁDĚRA, A., BŮŽĚK, Z., KAFKA, V.: *Metalurgie oceli na odlitky*. VUTIUM, 2008, ISBN 978-80-214-3632-9.
- [2] ELBEL, T., HAVLÍČEK, F., JELÍNEK, P., LEVÍČEK, P., ROUS, J., STRÁNSKÝ, K.: *Vady odlitků ze slitin železa (klasifikace, příčiny a prevence)*. MATECS, Brno 1992, 340 s.
- [3] ZÁDĚRA, A., ŠENBERGER, J., VAVRINEC, P., VESELÝ, P., BŘINČIL, T.: Reoxidační pochody při odlévání a vznik některých vad u odlitků z oceli. In *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské VŠB – TU Ostrava*, řada hutnická, roč. L, 2007, č. 1, s. 261–268, ISSN 1210-0471.
- [4] ŠENBERGER, J., ZÁDĚRA, A., VAVRINEC, P.: Reoxidace kovu během odlévání a vznik vad odlitků. *Technologické inženýrstvo*, roč. 4, č. 1, 2007, s. 45-47, ISSN 1336-5967.